



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA  
Departamento de Física Aplicada.

---

# CARACTERIZACIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA DE DOBLE RECUBRIMIENTO DOPADA CON TIERRAS RARAS MEDIANTE MÉTODOS DINÁMICOS.

---

**Autora:**

Andrea Iranzo Almalé

**Directores:**

Juan Carlos Martín  
Juan Antonio Vallés

Curso 2019 - 2020

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Bases teóricas</b>	<b>2</b>
2.1. Modelo teórico . . . . .	2
2.2. Láser en régimen transitorio . . . . .	3
2.3. Expresiones teóricas . . . . .	4
<b>3. Caracterización</b>	<b>7</b>
3.1. Montaje experimental . . . . .	7
3.2. Proceso de medición . . . . .	8
3.2.1. Determinación de a y b . . . . .	10
3.2.2. Determinación de $\gamma_a(\nu_l)$ . . . . .	11
3.2.3. Determinación de X . . . . .	12
3.2.4. Determinación de Y . . . . .	13
3.2.5. Determinación de $\gamma_a(\nu_p)$ . . . . .	15
3.3. Resultados finales . . . . .	16
<b>4. Análisis de los resultados y errores</b>	<b>17</b>
4.1. Errores en las longitudes de la fibra activa y del anillo . . . . .	17
4.2. Errores en la transmisión del anillo . . . . .	18
4.3. Errores en el método . . . . .	20
<b>5. Conclusiones</b>	<b>21</b>

# 1. Introducción

El estudio de los láseres de fibra activa conlleva, en ocasiones, la realización de modelos que expliquen su comportamiento con el objetivo de optimizarlos. En este trabajo, se tratará de caracterizar una fibra óptica activa, extrayendo una serie de características que serán útiles en la modelización del láser.

Aunque no existe un único método para la caracterización de una fibra óptica activa, en este caso el trabajo se centrará en tratar de realizarla mediante el estudio del comportamiento dinámico de un láser de fibra óptica activa. Se ha elegido centrar el estudio en el comportamiento dinámico por las ventajas que presenta frente al caso estacionario: en este último toda la información se obtiene a partir de medidas de potencia óptica, que introducen errores significativos. Por el contrario, al estudiar el comportamiento dinámico es posible extraer información a partir de los perfiles de evolución de algunas magnitudes, con lo que es posible reducir el error [2]. El hecho de que sea posible evitar medidas de potencia en el estudio dinámico del láser permitirá evitar errores significativos.

En concreto, dentro de los casos dependientes del tiempo, centraremos el estudio en el régimen transitorio, donde es posible determinar parámetros como la frecuencia de oscilación, el tiempo de carga o el amortiguamiento. Esto junto con datos de la cavidad, tales como la transmisión o la longitud del anillo, y ciertas medidas del comportamiento del láser permitirán finalmente caracterizar la fibra óptica dopada con erbio. Aunque en un principio se planteó utilizar, en su lugar, fibra óptica de doble recubrimiento dopada con iterbio pero se descartó finalmente, optando por la dopada con erbio.

En el desarrollo de este documento se verá en primer lugar las bases teóricas sobre las que se sustenta este método y se deducirá qué parámetros se van a medir.

En el ámbito experimental, se comentará el tipo de montaje utilizado, cómo se han realizado las medidas y los parámetros que se irán obteniendo a partir de estas.

Finalmente, con los resultados se logrará la caracterización de la fibra óptica activa y su posterior análisis dará información acerca de la adecuación del procedimiento realizado.

## 2. Bases teóricas

En este apartado, se pretende presentar un modelo que simule el comportamiento de una fibra óptica dopada con erbio. A partir de este se podrán obtener las expresiones matemáticas que expliquen el comportamiento de los láseres de fibra óptica activa. Se comentará además, el comportamiento de un láser en régimen transitorio, puesto que tendrá un papel importante en la caracterización de la fibra óptica dopada.

### 2.1. Modelo teórico

En primer lugar, se mostrará el esquema de niveles que presenta el ión erbio. En este caso, las bandas de energía se pueden aproximar a un esquema de cuasi tres niveles tal como se ve en la figura 1.

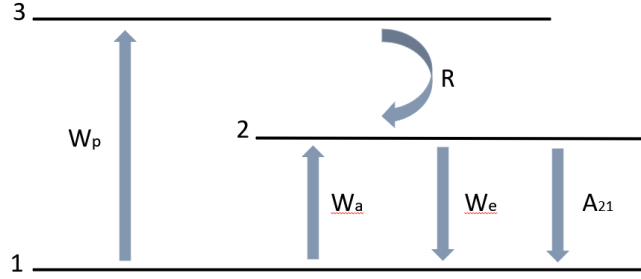


Figura 1: Esquema de niveles del ion erbio con transiciones radiativas (flechas rectas) y no radiativas (flechas curvas)

Donde el nivel 1 corresponde a la banda  $^4I_{15/2}$  y tanto la 2 como la 3 forman parte de la banda  $^4I_{13/2}$ .

Partiendo de un modelo general, se llegará a una formulación matemática compleja, lo que dificultará la interpretación física de los parámetros que aparecen en ella [3]. Por tanto, se empleará el modelo de factores de solapamiento en el que se introducirán los parámetros de acoplamiento  $\eta_0(\nu)$ ,  $\eta_1(\nu)$  y  $\eta_2(\nu)$  [4].

Estos parámetros se pueden reformular mediante los coeficientes de absorción y emisión  $\gamma_a(\nu)$  y  $\gamma_e(\nu)$ . Que vienen dadas por la expresión (1).

$$\gamma_i(\nu) = \nu_0(\nu)\sigma_i(\nu)N_T \quad i = a, e \quad (1)$$

Donde  $\sigma_a(\nu)$  y  $\sigma_e(\nu)$  corresponden a las secciones eficaces de absorción y emisión de la transmisión entre los niveles 1 y 2 y  $N_T$ , a la concentración de dopante.

Para caracterizar la fibra óptica activa, trataremos de determinar los coeficientes de absorción y emisión tanto para la frecuencia del bombeo introducido, como para la frecuencia de emisión del láser. Resulta más interesante medir estos parámetros ya que evitan trabajar con las secciones eficaces, que implicarán conocer el perfil transversal del dopante.

## 2.2. Láser en régimen transitorio

En este apartado se comentará la evolución temporal de la potencia de emisión láser en régimen transitorio, puesto que permitirá introducir ciertos parámetros necesarios para la caracterización de la fibra activa.

Al introducir un bombeo de potencia constante, el nivel superior del erbio se irá poblando, por lo que la inversión de población en la fibra activa aumentará hasta que llegue a un valor crítico en el que el láser comenzará a emitir. La potencia del láser irá aumentando hasta que, llegado un momento, la inversión de población comience a disminuir. Cuando llegue a valores inferiores a la inversión de población crítica, la potencia láser disminuirá rápidamente. Como sigue existiendo una potencia de bombeo constante, se repetirá el proceso de modo que se irán dando sucesivas oscilaciones en la potencia del láser siguiendo el mismo proceso que se ha comentado anteriormente, aunque serán amortiguadas con una constante de amortiguamiento  $t_0$ , hasta llegar a un valor prácticamente constante. De esta forma, la potencia de emisión láser tendrá una evolución similar a la mostrada en la figura 2.

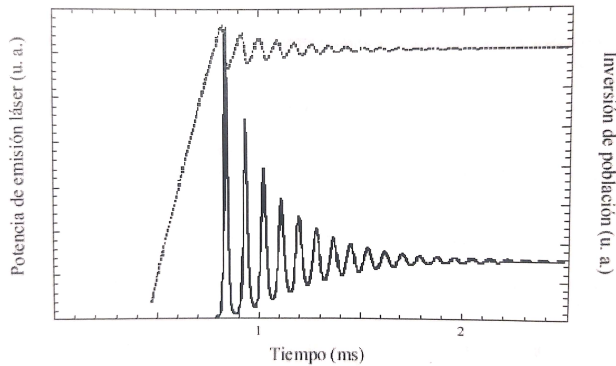


Figura 2: Evolución temporal de la potencia de emisión láser (línea continua) y de la inversión de población (línea discontinua)

De aquí es posible extraer algunos parámetros característicos del régimen transitorio. En primer lugar, es posible medir la frecuencia angular de oscilación,  $\omega$ . Además del tiempo de carga  $T_b$ , correspondiente al tiempo transcurrido entre la conmutación del bombeo y el primer pico de potencia láser. Y por último, el amortiguamiento  $t_0$ : el tiempo característico al que se ajusta la envolvente.

### 2.3. Expresiones teóricas

Adaptando el modelo al caso de láseres de fibras dopadas con erbio, se llegará a las expresiones que relacionarán los parámetros concretos del régimen transitorio con los parámetros de interés de la fibra activa.

En primer lugar, se puede ver que la frecuencia angular de oscilación  $\omega$  admite una aproximación a dependencia lineal con la potencia de bombeo introducida en el sistema [3].

$$w^2 = (aP_p + b) - \left(\frac{1}{t_0}\right)^2 \approx aP_p + b \quad (2)$$

Donde se puede utilizar la aproximación dado que  $(aP_p + b) \gg (1/t_0)$ .

A su vez, los parámetros de los ajustes dependen de características de la cavidad y del medio activo, tal como se ve en las ecuaciones (3) y (4). Precisamente estas características del medio activo son las que permitirán caracterizar la fibra dopada con erbio.

$$a = \frac{c}{Dh\nu_p N_T} \left[ (\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p)) (\ln(T) - \gamma_a(\nu_l)L) + \gamma_a(\nu_p) (\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l)) \right] \quad (3)$$

$$b = \frac{c}{D\tau} (\ln(T) - \gamma_a(\nu_l)L) \quad (4)$$

Por otro lado, se puede ver en la ecuación 5, que el tiempo de carga  $T_b$  estará relacionado con la potencia de bombeo.

$$T_b = - \frac{\ln \left( 1 + \frac{(\ln(T) - \gamma_a(\nu_l)) L \left( P_p (\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p)) + \frac{h\nu_p N_T}{\tau} \right)}{P_p \gamma_a(\nu_p) (\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l)) l} \right)}{\left( P_p \frac{(\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p))}{h\nu_p N_T} + \frac{1}{\tau} \right)} \quad (5)$$

De estas ecuaciones se buscará obtener  $\gamma_a(\nu_l)$ ,  $\gamma_e(\nu_l)$ ,  $\gamma_a(\nu_p)$  y  $\gamma_e(\nu_p)$ , parámetros que no se pueden medir directamente pero que son necesarios para caracterizar la fibra óptica activa. Donde  $\nu_p$  será un valor fijo mientras que se variará  $\nu_l$ .

Tabla 1: Definición de las variables introducidas en las ecuaciones

$T_b$	Tiempo de carga
$\omega$	Frecuencia angular de oscilación
$t_0$	Amortiguamiento de las oscilaciones
$P_p$	Potencia de bombeo introducida en el sistema
$\gamma_a(\nu)$ y $\gamma_e(\nu)$	Coefficientes de absorción y emisión de la fibra óptica activa
$T$	Transmisión total del anillo
$D$	Camino óptico recorrido ( $D = n \cdot l$ )
$\tau$	Tiempo de vida media del nivel $^4I_{13/2}$
$l$	Longitud del anillo
$L$	Longitud de la fibra activa

De todos los parámetros mostrados en la tabla 1, los únicos que no se podrán medir directamente serán los referidos a los coeficientes de absorción y emisión.

Para simplificar la resolución se utilizará:

$$X = \frac{(\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p))}{h\nu_p N_T} \quad (6)$$

$$Y(\nu_l) = \frac{(\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l))}{h\nu_p N_T} \quad (7)$$

De modo que las variables que se tratarán de determinar serán  $\gamma_a(\nu_l)$ ,  $\gamma_e(\nu_l)$ ,  $X$  e  $Y$ .

De esta forma, se pueden obtener los parámetros de ajuste  $a$  y  $b$  mediante la frecuencia de las oscilaciones en función de la potencia de bombeo. Con las ecuaciones (3), (4) y (5) se determinarán los cuatro parámetros desconocidos, pero para ello será necesario una ecuación extra. Esta será la ecuación (8) [3].

$$P_{l0} = \frac{\left( \frac{\ln(T) - \gamma_a(\nu_l)L}{\tau} \right) h\nu_l N_T}{(\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l)) \ln(T)} \cdot \left( \frac{P_p}{P_{th}} - 1 \right) \quad (8)$$

Donde  $P_{l0}$  representa el promedio de la potencia láser a lo largo de  $z$  en la fibra activa, que se puede obtener mediante la ecuación (9) .

$$P_{l0} = \left( \frac{1 + T}{2} \right) P_l(0) \quad (9)$$

Con  $P_l(0)$  la potencia en  $z=0$  de la fibra activa, donde este punto representa el extremo de la fibra activa por la que se introduce el bombeo.

De esta forma se tendrán cuatro ecuaciones que deberían permitir obtener las cuatro incógnitas mencionadas para cada valor de  $\lambda$ , lo que supondrá realizar el ajuste lineal de  $a$  y  $b$  con la potencia de bombeo para cada longitud de onda. Del mismo modo, será necesario realizar un ajuste lineal de  $P_{l0}$  en función de la potencia de bombeo, tal como indica la ecuación (8), para cada longitud de onda. Lo que complicará la determinación de los coeficientes de absorción y emisión.



### 3. Caracterización

En este apartado se tratará de describir la caracterización del láser de fibra dopada con erbio. Para ello, en primer lugar se estudiará el montaje utilizado. Una vez aclarado esto se establecerá una ruta de trabajo a partir de las ecuaciones ya vistas en el apartado anterior: se comentará en qué orden se irán calculando las incógnitas, qué parámetros es necesario conocer y cómo medir cada uno de ellos.

#### 3.1. Montaje experimental

El montaje utilizado para este caso se muestra en la figura 3.

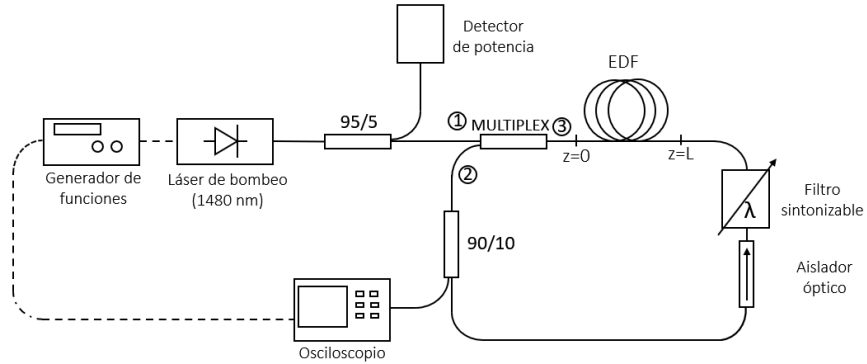


Figura 3: Esquema del montaje experimental para la caracterización de la fibra óptica activa (EDF). Se distingue la fibra activa (línea continua) y el circuito eléctrico (línea discontinua)

En primer lugar, tendremos un generador de funciones conectado al láser de bombeo, de  $\lambda = 1480 \text{ nm}$ , que modulará su potencia con una función cuadrada tal como se mencionó anteriormente.

A la salida del láser de bombeo, se encontrará un divisor que llevará el 5 % de la potencia a un detector de potencia que permitirá conocer el valor de la potencia de bombeo introducida en el anillo en todo momento.

El 95 % restante de la potencia pasará a un multiplexador que introducirá el bombeo en la cavidad del anillo, pasando de la entrada 1 a la salida 3 del multiplexador. La transmisión de este multiplexador viene dada en la figura 4.

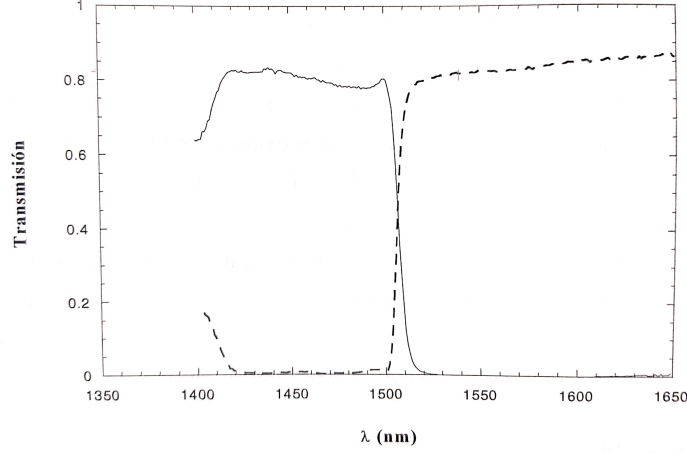


Figura 4: Transmisión del multiplexador en función de  $\lambda$  de la entrada 1 a la salida 3 (línea continua) y de la entrada 2 a la salida 3 (línea discontinua)[3]

En cuanto al resto de la cavidad, se tendrá un anillo de longitud "l", donde se encontrarán un aislador, que definirá el sentido de propagación de la ASE generada, y un filtro sintonizable en la banda de  $\lambda = 1530 - 1560$  nm, además del medio activo, de longitud "L" que corresponde a la fibra óptica dopada con erbio que se tratará de caracterizar.

Para extraer la señal del anillo se utilizará un divisor que llevará el 10 % de la señal a un detector, mientras que el terminal del 90 % se conectará al multiplexador para cerrar el anillo. Este detector, en principio, será un fotodiodo conectado a un osciloscopio. En este osciloscopio, se introducirá la salida del anillo en un canal y la intensidad de alimentación del bombeo en otro, de modo que se puedan comparar ambas. Con esto se podrá visualizar  $T_b$ , el tiempo entre el encendido del bombeo y la aparición del primer pico en la potencia de salida del láser. En otros casos, se utilizará en su lugar un OSA, dependiendo del tipo de medida que se quiera tomar.

### 3.2. Proceso de medición

Veamos qué proceso vamos a seguir para obtener los parámetros que buscamos:  $\gamma_a(\nu_l)$ ,  $\gamma_a(\nu_p)$ ,  $X(\nu_p)$ ,  $Y(\nu_l)$ . De esta forma, una vez establecido el orden en que se va a operar podremos ver qué parámetros es necesario conocer y qué medidas habrá que realizar.

En primer lugar, los valores de  $a$  y  $b$  se obtendrán mediante el ajuste lineal de  $\omega^2$  con la potencia de bombeo, siendo  $a$  y  $b$  los parámetros de ajuste, tal como indica la ecuación (2). Con estos valores, es posible obtener directamente  $\gamma_a(\nu_l)$  con la ecuación (4) y por otra parte, a partir de la ecuación (5), se podrá calcular  $X$ , como se muestra en la ecuación (10).

$$T_b \left( P_p X + \frac{1}{\tau} \right) = \ln \left( \frac{P_p(a - Xb\tau)}{P_p a + a} \right) \quad (10)$$

Por último se utilizarán las expresiones (6) y (3) para obtener  $Y$  y  $\gamma_a(\nu_p)$ , respectivamente, tal como se muestra en las ecuaciones (11) y (12).

$$P_{l0} = \frac{bD}{c \ln T} \frac{\nu_l}{\nu_p} \frac{1}{Y} \left( \frac{P_p}{P_{pth}} - 1 \right) \quad (11)$$

$$Y \gamma_a(\nu_p) = \frac{D}{cL} (a - Xb\tau) \quad (12)$$

Con este esquema se puede ir viendo qué parámetros es necesario medir. En primer lugar, necesitaremos el valor de la longitud del anillo,  $l$ , y la longitud de la fibra activa,  $L$ , que además nos darán directamente el camino óptico recorrido  $D = nl$ , siendo  $n$  el índice de refracción. Aunque estas longitudes se podrían determinar experimentalmente, en este caso se toman como datos bibliográficos [3]. Se utilizará además el tiempo de vida media del  $^4I_{13/2}$  en la fibra óptica dopada con erbio y la concentración de dopante.

Tabla 2: Datos bibliográficos [3]

L (m)	5
l (m)	22
n	1,46
$\tau$ (ms)	10,1
$N_T$ ( $m^{-1}$ )	$3,64 \cdot 10^{13}$

Por otro lado, es necesario conocer la transmisión del anillo  $T$ , que en este caso se tomó como dato bibliográfico [3]. Se muestran estos datos bibliográficos en la figura 6, ya que no se pudo hacer como estaba previsto. No obstante se mencionará la forma de proceder.

La transmisión se puede obtener haciendo modificaciones sobre el propio montaje. Para ello, se eliminará la fibra activa del montaje anterior. En uno de los extremos libres que queden de la fibra pasiva se introducirá una señal de potencia calibrada, teniendo en cuenta la dirección marcada por el aislador, y en el restante, mediremos la potencia que llega con un OSA o un detector. Viendo el cociente entre la potencia a la entrada y la que llega al final

podremos obtener la transmisión del anillo T. Como la transmisión varía con la longitud de onda, tendremos distintos valores para cada  $\lambda_i$ . El montaje utilizado se muestra en la figura 5.

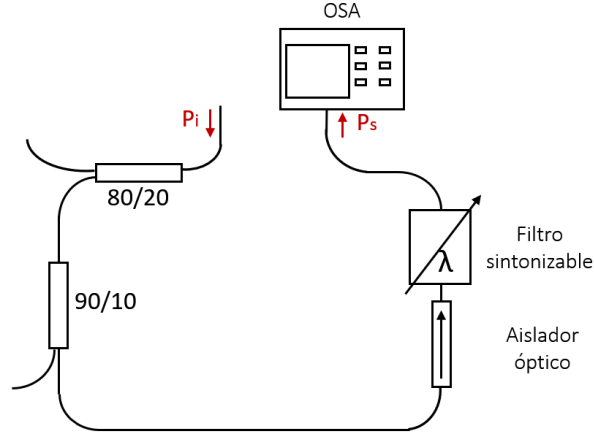


Figura 5: Montaje experimental para la determinación de la transmisión del anillo

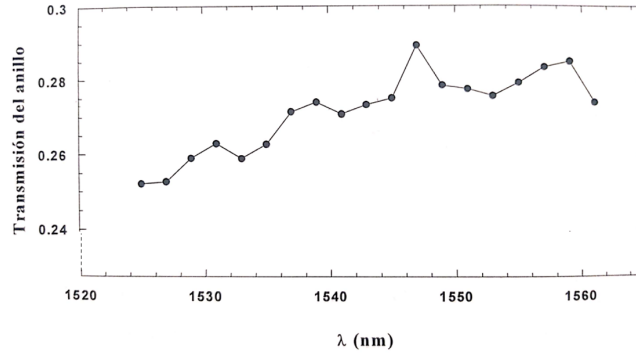


Figura 6: Transmisión del anillo en función de  $\lambda$  seleccionada por el filtro [3]

### 3.2.1. Determinación de a y b

Se verá ahora como será la obtención de los parámetros buscados. En primer lugar, se medirá la frecuencia de oscilación a partir del tiempo necesario para que se den diez máximos en la potencia de emisión del láser. Es importante tener en cuenta que no es recomendable medir las primeras oscilaciones ya que todavía varían mucho, pero si se encuentran demasiado cerca de la zona en la que la potencia se vuelve prácticamente constante, las oscilaciones serán muy pequeñas y difíciles de medir correctamente.

Con ello se podrá calcular  $\omega$ . Se realiza esto mismo para distintas potencias de bombeo y, en cada una de ellas, para distintos valores de longitud de onda del láser, que se seleccionarán

mediante el filtro sintonizable. De la recta de ajuste, se obtendrán  $a$  y  $b$  como la pendiente y la ordenada en el origen, respectivamente, al representar  $\omega^2$  en función de la potencia de bombeo introducida. Estos valores dependen de la longitud de onda de emisión del láser que escojamos por lo que se tendrán unos valores de  $a$  y  $b$  para cada  $\lambda_l$ . Estos resultados se muestran en la tabla 3.

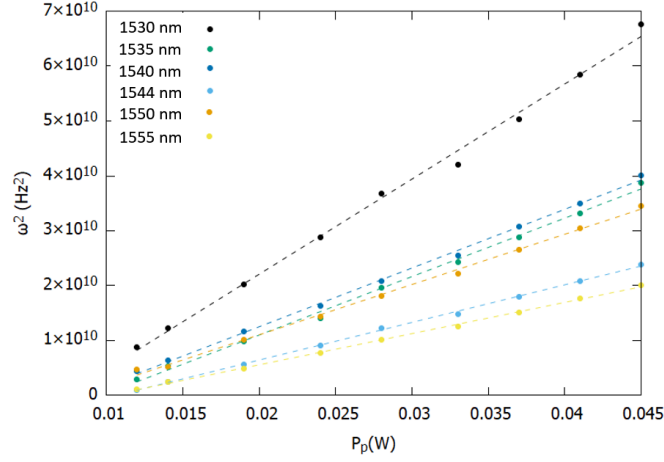


Figura 7: Representación de la frecuencia angular de oscilación al cuadrado en función de la potencia de bombeo para distintas  $\lambda$  (puntos) con sus correspondientes ajustes lineales (líneas discontinuas)

Tabla 3: Parámetros de ajuste obtenidos en función de  $\lambda$

$\lambda$ (nm)	$a$ ( $Hz^2W^{-1}$ )	$b$ ( $Hz^2$ )
1530	$1,74 \cdot 10^{12}$	$-1,26 \cdot 10^{10}$
1535	$1,07 \cdot 10^{12}$	$-1,03 \cdot 10^{10}$
1540	$1,07 \cdot 10^{12}$	$-8,91 \cdot 10^9$
1544	$6,86 \cdot 10^{11}$	$-7,28 \cdot 10^9$
1550	$9,17 \cdot 10^{11}$	$-7,29 \cdot 10^9$
1555	$5,69 \cdot 10^{11}$	$-5,80 \cdot 10^9$

### 3.2.2. Determinación de $\gamma_a(\nu_l)$

Con  $a$  y  $b$  ya calculados se puede pasar a determinar  $\gamma_a(\nu_l)$  mediante la ecuación (4). Hay que tener en cuenta que este parámetro varía con la frecuencia de emisión del láser, de modo que se tendrá un valor distinto para cada longitud de onda de emisión del láser medida.

Tabla 4: Coeficiente de absorción en función de la frecuencia de emisión del láser

$\lambda$ (nm)	$\gamma_a(\nu_l)$ ( $m^{-1}$ )
1530	2,46
1535	1,96
1540	1,67
1544	1,32
1550	1,32
1555	1,00

### 3.2.3. Determinación de X

Una vez conocidos a y b para las distintas longitudes de onda del láser podemos obtener, además de  $\gamma_a(\nu_l)$ , el valor de X. Para ello se utilizará la ecuación (10). Se puede ver que será necesario medir el parámetro restante comentado del láser en régimen transitorio: el tiempo de carga  $T_b$ .

Se medirá  $T_b$  para distintas longitudes de onda en función de la potencia de bombeo introducida en el sistema. Se muestran los resultados en la gráfica 8.

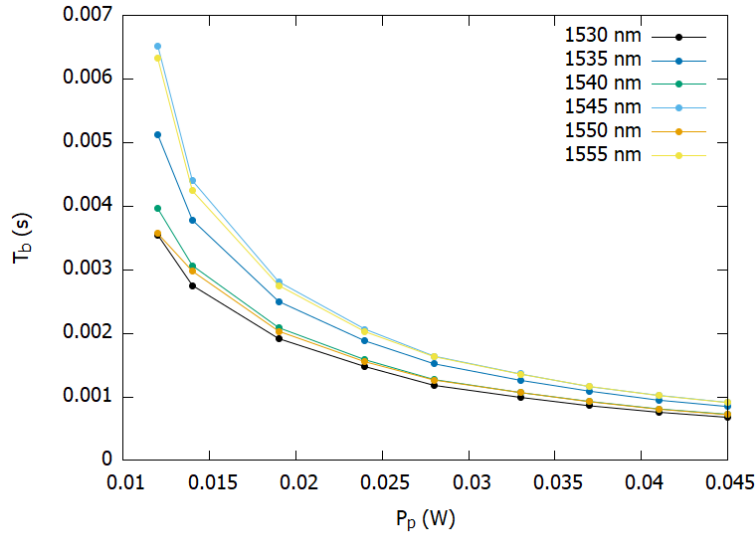


Figura 8: Medidas experimentales del tiempo de carga en función del bombeo aplicado(círculos). Se añaden líneas para facilitar la visualización

En este caso, el cálculo no será tan directo como en el procedimiento anterior por lo que será necesario recurrir a una resolución numérica para obtener el valor de X.

Además, como este valor sólo depende de la longitud de onda de bombeo y no de la  $\lambda$  del láser, se puede obtener X para cada  $\lambda$  medida y luego hacer la media de los resultados obtenidos para cada una de ellas (Tabla 5). De este modo, se tratará de minimizar el error que puedan tener las distintas medidas.

De igual modo, se puede realizar este proceso para distintas potencias de bombeo con el fin de asegurar que un valor de potencia de bombeo demasiado alto o bajo no altere los resultados. Por ejemplo, un valor demasiado bajo podría haber hecho que las medidas tuvieran demasiado ruido y el resultado se alejara de lo que se obtendría en los demás casos.

Tabla 5: Resultados obtenidos para X con un bombeo de  $P_p = 0,041$  W

$\lambda$ (nm)	X ( $W^{-1}s^{-1}$ )
1530	56436,5
1535	49941,3
1540	57568,7
1544	47939,8
1550	55415,8
1555	46328,6

Con lo que finalmente tomaremos como valor de X:

$$X=52271,8 \pm 4791,8 W^{-1}s^{-1}$$

Se puede ver que presenta una dispersión muy grande en los resultados obtenidos para distintas longitudes de onda. Analizando la ecuación (10), se puede apreciar que los parámetros que podrían introducir este error son  $a$  y  $b$ , siendo  $b$  la ordenada en el origen que en principio introducirá mayor error, aunque se analizará con detalle más adelante.

Por lo tanto, se obtiene:

$$(\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p))= 0,26 m^{-1}$$

### 3.2.4. Determinación de Y

Para hallar Y, se utilizará la ecuación (12) pero para ello, es necesario medir la potencia láser a la salida del anillo en función de la potencia de bombeo. En este caso, estas medidas se realizaron para  $\lambda_l= 1540$  nm, por lo que obtendremos el valor de Y para esta longitud de onda únicamente.

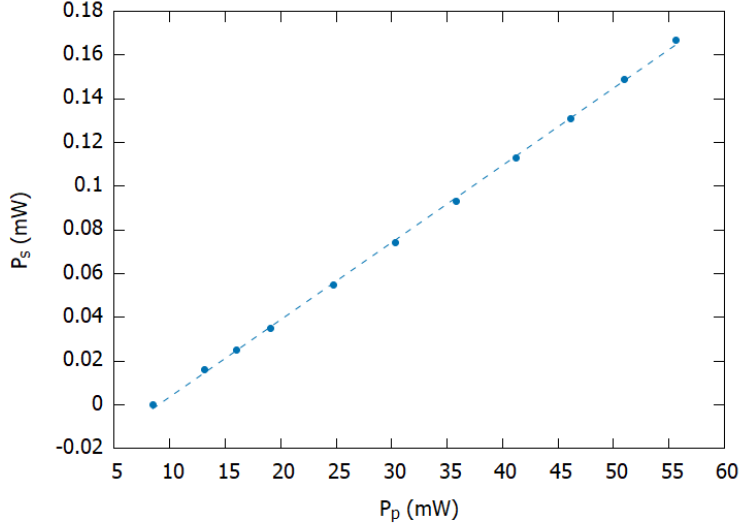


Figura 9: Potencia del láser a la salida del sistema para  $\lambda = 1540$  nm en función de la potencia de bombeo (puntos) con su correspondiente ajuste lineal (línea discontinua)

Una vez medido la potencia láser a la salida del anillo ( Gráfica 9) se puede determinar la potencia de bombeo umbral  $P_{th}$  como el valor de la potencia de bombeo para el que comienza a haber potencia láser. De esta forma se tiene:

$$P_{th} = 0,0086 \text{ W}$$

Además, teniendo en cuenta que  $P_{th}$  también se puede obtener como  $P_{th} = -\frac{b}{a}$ , tendremos otro resultado para la potencia de bombeo umbral con el que comparar:

$$P_{th} = 0,0083 \text{ W}$$

Lo que es un buen indicador teniendo en cuenta que este calibrado se realizó mucho antes que el resto de las medidas.

A partir de la potencia del láser a la salida se puede obtener  $P_{l0}$ . Para ello en primer lugar se obtendrá la potencia del láser al inicio de la fibra activa ( $z=0$ ) teniendo en cuenta los factores de acoplamiento de los dos multiplexadores que recorre la señal desde la fibra activa hasta la salida del láser, que es donde se está midiendo. Una vez hallado esto, se obtendrá  $P_{l0}$  aplicando la expresión (9) teniendo en cuenta que se puede extraer la transmisión de la figura 6.

Con esto, se puede representar  $P_{l0}$  en función de  $\frac{P_p}{P_{th}}$  y de la pendiente del ajuste lineal se podrá extraer  $Y(\lambda_l = 1540 \text{ nm})$  tal como se muestra en la figura 10.



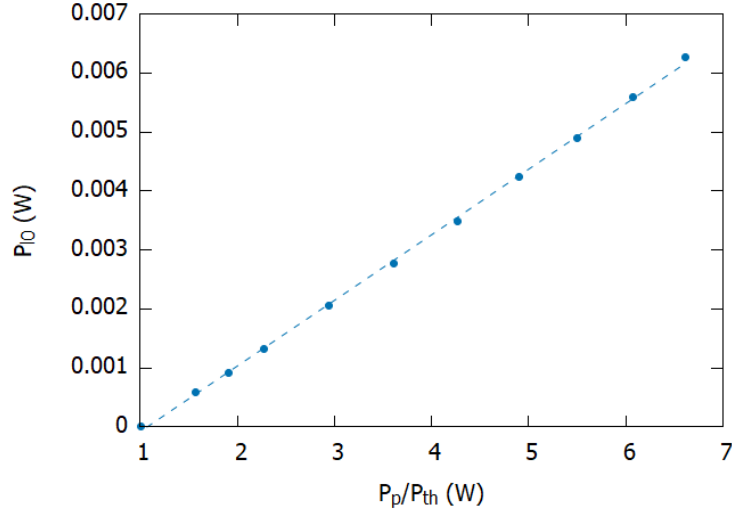


Figura 10: Potencia promedio del láser en la fibra activa en función de la potencia de bombeo entre la potencia de bombeo umbral(puntos) con su respectivo ajuste lineal (línea discontinua)

Con lo que obtenemos:

$$Y(\lambda_l = 1540 \text{ nm}) = 3,13 \text{ (W}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$$

### 3.2.5. Determinación de $\gamma_a(\nu_p)$

Una vez determinado Y para una valor concreto de  $\nu_l$  se puede calcular  $\gamma_a(\nu_p)$  simplemente utilizando la ecuación (12). Así extraemos:

$$\gamma_a(\nu_p) = 0,21 \text{ m}^{-1}$$

Además, este parámetro es el mismo independientemente del valor de  $\nu_l$  por lo que utilizando esta misma expresión se puede obtener Y para distintas longitudes de onda de emisión del láser. Para ello se tomarán los parámetros a y b correspondientes de cada longitud de onda de emisión del láser mientras que X y  $\gamma_a(\nu_p)$  serán constantes para todas ellas.

Tabla 6: Resultados para  $Y(\nu_l)$  y  $(\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l))$  para distintos valores de  $\lambda$

$\lambda$ (nm)	$Y$ ( $W^{-1}s^{-1}$ )	$(\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l))$ ( $m^{-1}$ )
1530	$9,16 \cdot 10^5$	4,48
1535	$6,43 \cdot 10^5$	3,14
1540	$6,42 \cdot 10^5$	3,14
1544	$4,32 \cdot 10^5$	2,11
1550	$5,13 \cdot 10^5$	2,51
1555	$3,37 \cdot 10^5$	1,65

### 3.3. Resultados finales

Una vez obtenidos todos los parámetros que buscábamos podemos mostrar todos a modo de resumen de lo obtenido:

Para la frecuencia de emisión del bombeo tenemos:

$$\gamma_a(\nu_p) = 0,21 \text{ m}^{-1}$$

$$\gamma_e(\nu_p) = 0,05 \text{ m}^{-1}$$

Se muestra en la tabla 7 los resultados obtenidos para la frecuencia de emisión del láser.

Tabla 7: Coeficientes de absorción y emisión de la fibra activa para las frecuencias de emisión del láser

$\lambda$ (nm)	$\gamma_a(\nu_l)$ ( $m^{-1}$ )	$\gamma_e(\nu_l)$ ( $m^{-1}$ )
1530	2,46	2,02
1535	1,96	1,18
1540	1,67	1,47
1544	1,32	0,80
1550	1,32	1,19
1555	1,00	0,65

Con estos parámetros obtenidos podríamos decir que se ha logrado caracterizar la fibra óptica activa.

## 4. Análisis de los resultados y errores

Con los datos finales obtenidos, pasamos a analizar los resultados con el fin de extraer información tanto de los resultados en sí como de la adecuación de los métodos empleados.

En primer lugar, se puede ver que tanto  $\gamma_a(\nu_l)$  como  $\gamma_e(\nu_l)$  no siguen una tendencia sencilla, parece que ambas presentan un máximo en el entorno de 1530 nm. Sin embargo, luego no decrecen de forma monótona e incluso variarán con la potencia de bombeo aplicada. Por otro lado, estos mismos parámetros para la frecuencia de emisión del láser de bombeo,  $\lambda = 1480$  nm, tienen valores mucho menores.

Sin embargo, para extraer más conclusiones sobre la variación de los coeficientes de absorción y emisión con  $\lambda$  sería necesario haber tomado más puntos, en este caso tenemos sólo seis y no nos permiten extraer información sobre el comportamiento de la fibra activa en otras longitudes de onda. Por lo tanto, se puede ver que para caracterizar la fibra completamente sería necesario medir más puntos o automatizar medidas para obtener un espectro más realista. Pero sí es posible comparar con datos bibliográficos para comprobar la validez de los resultados obtenidos y extraer más información.[3]. De aquí podemos concluir que los resultados obtenidos se acercan a los mostrados en la bibliografía aunque con ligeras variaciones.

Podemos ver por lo tanto, qué factores han podido afectar a largo del proceso de medición, produciendo las diferencias entre nuestros resultados y los bibliográficos. Podemos analizar qué parámetros de los tomados como datos conocidos han podido variar, afectando a los resultados. Del mismo modo, se analizará también qué parámetros introducen mayor error.

### 4.1. Errores en las longitudes de la fibra activa y del anillo

Podemos comenzar considerando el error que introducen los parámetros  $L$ , la longitud de la fibra dopada con erbio, y la longitud de la cavidad de anillo,  $l$ .

Estos parámetros pueden determinarse de distintas formas. A priori, uno podría pensar en medirlos directamente a mano, pero existen opciones más precisas. Se planteó la idea de determinarlas con otros procedimientos ópticos pero finalmente se tomaron como datos bibliográficos. Al hacer esto, estamos introduciendo un error ya que el sistema habrá experimentado cambios en la longitud de las fibras desde que se midieron los datos que se toman como bibliográficos hasta que se utilizó para tomar las medidas de este trabajo. Cada vez que se quitaban soldaduras viejas y se rehacían estábamos perdiendo longitud en la fibra.

Este error no debería tener gran importancia ya que, en principio, son variaciones pequeñas de la longitud en comparación con los 22 metros de fibra que componen el anillo y los 5 m de la fibra activa.

Se puede ver como varían los datos ante una disminución de medio metro en la longitud del anillo para tener una idea de los errores que podrían introducir. Se consideran únicamente variaciones en el anillo y no en la fibra activa ya que la fibra pasiva es la que se habrá manipulado en más ocasiones.

Si  $l=21,5$  m nos encontramos con:

$$\gamma_a(\nu_p) = 0,21 \text{ m}^{-1}$$

$$\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p) = 0,26 \text{ m}^{-1}$$

Tabla 8: Coeficientes de absorción y emisión para la frecuencia del láser al reducir la longitud del anillo 5 m

$\lambda$ (nm)	$\gamma_a(\nu_l)$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$\gamma_e(\nu_l)$ ( $\text{m}^{-1}$ )
1530	2,33	2,04
1535	1,86	1,21
1540	1,58	1,94
1544	1,24	0,82
1550	1,25	1,20
1555	0,94	0,67

Así se puede ver que aún con una disminución de medio metro en la longitud del anillo, los coeficientes relacionados con la frecuencia de bombeo se mantienen constantes mientras que los relacionados con la frecuencia de emisión del láser varían en el entorno de una décima. Por lo tanto, aun en un caso extremo en el que hubiéramos eliminado 0,5 m de fibra, los resultados finales no variarían más de 1 ó 2 décimas.

## 4.2. Errores en la transmisión del anillo

Algo similar a lo anterior ocurre si consideramos la transmisión total del anillo. Este parámetro se podía medir, tal como comentamos anteriormente, mediante el cociente entre la señal introducida en el anillo y la extraída al final, eliminando del montaje la fibra activa.

Sin embargo, al tomarlo como dato bibliográfico no tuvimos en cuenta las variaciones que se podían haber dado en el montaje. La diferencia más clara es que en el momento en el que se tomaron las medidas de la transmisión que utilizamos, el filtro se conectaba con el resto del anillo mediante dos conectores pero actualmente el filtro estaba soldado al circuito. Las soldaduras introducen menos pérdidas que los conectores por lo que probablemente, los datos de transmisión utilizados fueran menores a los reales a la hora de tomar las medidas para la caracterización de la fibra.

De nuevo, se puede estudiar cómo podría afectar la variación de la transmisión en nuestros resultados.

En primer lugar,  $\gamma_a(\nu_l)$  depende del  $\ln(T)$ , de modo que variará muy poco con T.  $\gamma_a(\nu_p) + \gamma_e(\nu_p)$  no depende de T por lo que tampoco se verá afectado.

El resto de las variables en cambio, sí se ven afectadas por cambios en la transmisión por lo que vamos a estudiar cómo varían ante un aumento del 5 % en T.

$$\gamma_a(\nu_p)=0,19 \text{ m}^{-1}$$

Tabla 9: Resultados de  $\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l)$  para un aumento de la transmisión del 5 % para distintas valores de  $\lambda$

$\lambda$ (nm)	T	$\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l) \text{ (m}^{-1}\text{)}$
1530	0,287	4,84
1535	0,290	3,40
1540	0,301	3,39
1544	0,303	2,28
1550	0,305	2,71
1555	0,307	1,78

Vemos que con un incremento en la transmisión del 5 % algunos valores de  $\gamma_a(\nu_l) + \gamma_e(\nu_l)$  varían hasta tres décimas por lo que podrían afectar a los resultados según la variación en la transmisión que nos hayan introducido las nuevas soldaduras.

Es interesante recalcar que es el parámetro  $\gamma_e(\nu_l)$  el que se ve afectado en mayor medida por las variaciones en la transmisión mientras que el resto de parámetros prácticamente no varían.

### 4.3. Errores en el método

Además de los errores mencionados en los apartados anteriores, relacionados con cómo se han tomado las medidas, podemos comentar otro aspecto que introduce error y que está más relacionado con el método elegido para caracterizar la fibra activa.

A la hora de realizar los ajustes lineales de la frecuencia al cuadrado de las oscilaciones en función de la potencia de bombeo para obtener  $a$  y  $b$ , podemos ver que los errores asociados al parámetro  $a$  son mucho menores, en porcentaje, que los de  $b$ .

Tabla 10: Error en tanto por ciento de  $a$  y  $b$  para los distintos valores de  $\lambda$

$\lambda$ (nm)	error $a$ (%)	error $b$ (%)
1530	2	10
1535	2	6
1540	2	6
1544	1	4
1550	2	7
1555	1	4

Sin embargo, si nos fijamos en las ecuaciones y el procedimiento que se ha utilizado, la mayoría de las ecuaciones dependen directamente de  $b$ . Por lo tanto, se está utilizando para determinar las incógnitas el parámetro que más error nos introduce.

Viendo esto, se puede plantear que para minimizar estos errores probablemente sería necesario buscar una forma alternativa de trabajar con las ecuaciones conocidas o incluso medir otros parámetros del régimen transitorio del láser, como puede ser el amortiguamiento. Así se podrían utilizar ecuaciones que dependan de  $a$  en lugar de  $b$ .

Por otro lado, hay que tener en cuenta que en este caso se ha decidido medir el tiempo de carga y la frecuencia de las oscilaciones puesto que son más directas de medir que  $t_0$ , que involucra extraer los datos de la evolución temporal de la potencia del láser y un posterior ajuste de la envolvente. Esta elección conlleva trabajar con  $a$  y  $b$ , que genera el problema comentado anteriormente, por lo que podría resultar interesante utilizar en su lugar  $t_0$  que introduciría  $a'$  [3].

Otra posible opción sería medir los  $t_0$  para, una vez determinados los parámetros desconocidos, calcularlo teóricamente y poder comparar con lo medido para comprobar la validez de los resultados. Sin embargo, dada la situación solo se midieron los necesarios para el cálculo.

## 5. Conclusiones

Se pueden obtener una serie de conclusiones de este trabajo. En primer lugar, se ha podido ver que la caracterización de una fibra óptica activa va ligada a la determinación de sus coeficientes de absorción y emisión. Además, estos varían con la frecuencia, por lo que será necesario trabajar con un sistema de ecuaciones por cada longitud de onda.

Es necesario medir los parámetros característicos del régimen transitorio, en este caso, el tiempo de carga y la frecuencia angular de las oscilaciones. Con ello, se ha comprobado que es posible caracterizar la fibra activa correctamente a pesar de existir elementos que introducen incertidumbre a los resultados. El más significativo de ellos, viene dado por el ruido introducido por  $b$ , que aparece en la mayoría de las expresiones matemáticas utilizadas.

Por otro lado, se ha podido ver que las variaciones en la longitud de la fibra pasiva del láser afectan muy poco, con una variación de 1 ó 2 décimas para una disminución de 5 m.

Por el contrario, las variaciones en la transmisión afectan en mayor medida a los coeficientes de absorción y emisión para la frecuencia de emisión del láser.

Se puede ver además, la importancia de elegir un método adecuado a la hora de caracterizar una fibra óptica activa, más allá de ser riguroso con las medidas experimentales. Como se ha observado, en este caso, trabajar con el parámetro  $b$  ha introducido una dispersión considerable en los parámetros determinados, que predomina frente al resto de los errores.

## Bibliografía

- [1] S. Jarabo (1994) *Estudio teórico y experimental de amplificadores de fibra óptica dopada con erbio* (Tesis doctoral)
- [2] J.C. Martín (1994) *Estudio de propiedades dinámicas de fibras ópticas dopadas con erbio* (Tesis doctoral)
- [3] I.J. Sola (2003) *Análisis dinámico y espectroscópico de láseres de fibra óptica dopada con erbio* (Tesis doctoral). Universidad de Zaragoza, España.
- [4] M.A. Rebolledo, S. Jarabo. Erbium-doped silica fiber modeling with overlapping factors. *Applied Optics*, 33, nº24 (1994)
- [5] M.A. Rebolledo, J.M. Álvarez, J.A. Vallés y J.C. Martín. Design of amplifiers and lasers made of Er-or Er/Yb-doped fibres or integrated waveguides. *Recent research developments in Optics*, 7, Part II, 205-254.
- [6] Agrawal, G.P.,(1997), *Fiber-Optic Communication Systems*, Rochester, NY, John Wiley & Sons, Inc.